

INFLUENCIA DE LAS DIATOMEAS COMO LLENANTE MINERAL EN EL
COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA
MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN CALIENTE MDC-19.

MICHELLE SMEIDER VARGAS AVENDAÑO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

BOGOTÁ D.C

2017

INFLUENCIA DE LAS DIATOMEAS COMO LLENANTE MINERAL EN EL
COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA
MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN CALIENTE MDC-19.

MICHELLE SMEIDER VARGAS AVENDAÑO

Trabajo de grado para optar el título de
Especialista en Ingeniería de Pavimentos

Asesor

CARLOS JOSE SLEBI

Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

BOGOTÁ D.C

2017



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	7
1. GENERALIDADES	9
2. JUSTIFICACIÓN	12
3. OBJETIVOS.....	14
4. MARCOS DE REFERENCIA	15
5. ENSAYOS A EVALUAR	24
6. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	26
7. ELABORACIÓN DE DISEÑO MDC-19 CON FILLER PROVENIENTE DE TRITURACIÓN DE ROCA	32
8. ELABORACIÓN DE DISEÑO MDC-19 CON ADICIÓN DE DIATOMEAS EN REEMPLAZO DEL FILLER DE TRITURACIÓN DE ROCA.....	38
9. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (T.S.R) INV E-725-13	44
10. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
11. CONCLUSIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	50

LISTADO DE TABLAS

TABLA 1. REQUISITOS DE LOS AGREGADOS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRADACIÓN CONTINÚA.	17
TABLA 2. FRANJAS GRANULOMÉTRICAS PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DE GRADACIÓN CONTINUA	23
TABLA 3. DISEÑO PRELIMINAR MEZCLA ASFÁLTICA	24
TABLA 4. RESULTADOS DEL TAMIZAJE TRITURADO PASA 3/4"	26
TABLA 5. RESULTADOS DEL TAMIZAJE ARENA PASA 3/8"	27
TABLA 6. RESULTADOS DEL TAMIZAJE GRANULOMETRÍA DE AGREGADOS COMBINADOS ..	29
TABLA 7. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS GRUESOS Y FINOS	30
TABLA 8. DISEÑO MARSHALL MDC-19 CON FILLER PROVENIENTE DE TRITURACIÓN	33
TABLA 9. RESULTADOS MÉTODO RICE.....	37
TABLA 10. FÓRMULA DE TRABAJO MDC-19 CON FILLER DE TRITURACIÓN DE ROCA	38
TABLA 11. DISEÑO MARSHALL MDC-19 CON DIATOMEAS	39
TABLA 12. RESULTADOS DEL ENSAYO TSR EN MDC-19 CON FILLER DE TRITURACIÓN DE ROCA	44
TABLA 13. CÁLCULO DEL T.S.R PARA MDC-19 CON FILLER DE TRITURACIÓN DE ROCA ..	44
TABLA 14. RESULTADOS DEL ENSAYO T.S.R EN MDC-19 CON ADICIÓN DE DIATOMEAS..	45
TABLA 15. CÁLCULO DEL TSR PARA MDC-19 CON ADICIÓN DE DIATOMEAS	45
TABLA 16. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ESTABILIDAD (N)	46
TABLA 17. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE FLUJO.....	47
TABLA 18. COMPARACIÓN VACÍOS CON AIRE (%).....	47
TABLA 19 . COMPARACIÓN DE VAM.....	48
TABLA 20. COMPARACIÓN DE VACÍOS LLENOS DE ASFALTO	48
TABLA 21. COMPARACIÓN DE RESISTENCIA CONSERVADA A LA TRACCIÓN INDIRECTA	48

LISTADO DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. CURVA DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA TRITURADO PASA 3/4"	27
ILUSTRACIÓN 2. CURVA DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA ARENA PASA 3/8"	28
ILUSTRACIÓN 3. CURVA DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA AGREGADOS COMBINADOS.	29
ILUSTRACIÓN 4. REPORTE DE CALIDAD DEL ASFALTO	31
ILUSTRACIÓN 5. ESTABILIDAD (N) - CONTENIDO DE ASFALTO (%). MDC-19	34
ILUSTRACIÓN 6. FLUJO - CONTENIDO DE ASFALTO (%). MDC-19.....	34
ILUSTRACIÓN 7. DENSIDAD (G/CM3) - CONTENIDO DE ASFALTO (%). MDC-19	35
ILUSTRACIÓN 8. PORCENTAJE DE VACÍOS EN LOS AGREGADOS MINERALES (%) - CONTENIDO DE ASFALTO (%). MDC-19	35
ILUSTRACIÓN 9. CONTENIDO DE VACÍOS CON AIRE (%) - CONTENIDO DE ASFALTO (%). MDC-19	36
ILUSTRACIÓN 10. VACÍOS LLENOS DE ASFALTO (%) - CONTENIDO DE ASFALTO (%).MDC- 19.....	36
ILUSTRACIÓN 11. MÉTODO RICE. MDC-19.....	37
ILUSTRACIÓN 12. ESTABILIDAD (N) - CONTENIDO DE ASFALTO (%). MDC-19 CON DIATOMEAS	40
ILUSTRACIÓN 13. FLUJO - CONTENIDO DE ASFALTO (%). MDC-19 CON DIATOMEAS	40
ILUSTRACIÓN 14. DENSIDAD (G/CM3) - CONTENIDO DE ASFALTO (%).MDC-19 CON DIATOMEAS	41
ILUSTRACIÓN 15. VACÍOS EN LOS AGREGADOS (%) - CONTENIDO DE ASFALTO (%). MDC- 19 CON DIATOMEAS	41
ILUSTRACIÓN 16. VACÍOS CON AIRE (%) - CONTENIDO DE ASFALTO (%). MDC-19 CON DIATOMEAS	42
ILUSTRACIÓN 17. VACÍOS LLENOS CON ASFALTO (%) - CONTENIDO DE ASFALTO (%). MDC-19 CON DIATOMEAS.....	42
ILUSTRACIÓN 18. MÉTODO RICE.....	43
ILUSTRACIÓN 19. RESULTADOS MÉTODO RICE	43

INTRODUCCIÓN

La mayoría de los pavimentos se encuentran formados en su capa superior por mezcla asfáltica, la cual está constituida por un agregado pétreo recubierto con una película de ligante bituminoso. Las cantidades relativas de estos materiales determinan el comportamiento y las propiedades de la mezcla, por lo cual es de vital importancia conocer a profundidad las características de dichos materiales.

Los agregados pétreos se dividen en gruesos (retenidos en el tamiz N° 4), finos (material que pasa el tamiz N° 4 retenido en el tamiz N° 200) y llenante mineral (pasa tamiz N° 200) o también llamado filler, los cuales se dosifican de tal manera que cumplan con una franja granulométrica de acuerdo a lo establecido en las especificaciones técnicas y teniendo en cuenta el tipo de capa que se requiera colocar.

El polvo mineral tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas por su elevada superficie específica, en función de su naturaleza, finura, actividad y proporción en la que forma parte de la mezcla. Los polvos minerales pueden ser el contenido en los áridos procedente de la trituración de los mismos; un producto comercial de naturaleza pulverulenta como el cemento o la ceniza volante procedente de central térmica o un polvo, en general calizo, especialmente preparado para este fin. (Morea, 2011).

Son conocidas las ventajas potenciales que algunos polvos minerales proporcionan a la mezcla asfáltica para resistir el efecto por envejecimiento. Sin embargo, a menudo no se toman en cuenta otros efectos que estos provocan en la mezcla, como el mejoramiento de las condiciones del medio continuo en el asfalto, donde pueden incrementar la magnitud de la resistencia a la deformación de la mezcla, sin modificar la naturaleza viscosa del mismo; mejorar la adherencia, y con ello proveer un mayor espesor a la lámina de asfalto que recubre a los agregados pétreos, permitiendo de este modo incrementar la durabilidad de la mezcla frente a la acción del desplazamiento por el agua. (Álvarez Loya, 2011)

Dada la relevancia del filler en las mezclas, en el presente trabajo de investigación se pretende evaluar la influencia de un filler compuesto por microfósiles unicelulares de algas sedimentadas denominadas diatomeas, de la especie *Aulocoseira granulata*, en una mezcla asfáltica en caliente de gradación tipo MDC-19, de tal manera que se contemplen como una alternativa para reemplazar

los filleres convencionales, teniendo en cuenta su presencia en los suelos colombianos y su favorable comportamiento en cuanto a parámetros de resistencia del suelo, especialmente altos valores de ángulo de fricción interno Φ' (Díaz Rodríguez, 2011).

1. GENERALIDADES

1.1 Línea de Investigación

Se realizará una investigación de tipo experimental acerca de la influencia de las diatomeas en el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica MDC-19, mediante ensayos de laboratorio que permitan comparar su desempeño con una mezcla patrón.

1.2. Planteamiento del Problema

La red vial Nacional cuenta con aproximadamente 5271 km construidos en pavimento flexible para vías de primer orden (INVIAS 2017), de los cuales solo un pequeño porcentaje se encuentra en óptimas condiciones; en su gran mayoría se presentan daños que afectan el confort y la seguridad de los usuarios, además de generar innumerables costos de rehabilitación y mantenimiento.

Teniendo en cuenta que la MDC-19 es una de las mezclas más utilizadas en el país, es importante estudiar los componentes de dichas mezclas con el fin de que éstas sean durables, estables, flexibles, resistentes, impermeables y trabajables. Sin embargo, la geología Colombiana es muy variable y se pueden fabricar con todo tipo de agregados, que si bien es cierto cumplen las especificaciones normativas, difieren en su comportamiento debido a su formación geológica y por consiguiente sus características de dureza, durabilidad y geometría cambian significativamente.

En la naturaleza existe una gran cantidad de materiales, de los cuales se evidencia poca información respecto a su comportamiento en el área de la infraestructura vial; es este el caso de la diatomita. Roca silícea, sedimentaria, constituida por diatomeas de color blanco a crema, suave al tacto, con una apariencia similar a la tiza y químicamente inerte posee unas características físico-químicas poco convencionales. El interés de la ingeniería en las diatomeas radica en que son ejemplos sobresalientes de materiales micro y nanoestructurados que afectan las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas de los suelos (Manosalva Sanchez & Naranjo Merchán, 2009), razón por la cual se hace necesario realizar investigaciones basadas en ensayos de laboratorio que permitan evaluar el desempeño de este tipo de material en las mezclas asfálticas densas en caliente.

1.2.1. Antecedentes del problema

Son múltiples las investigaciones que se han enfocado en la modificación de mezclas asfálticas mediante el reemplazo de materiales convencionales por otros, que debido a sus propiedades físicas y químicas, permitan una modificación en el comportamiento de dichas mezclas. Sin embargo, con respecto a la inclusión de diatomeas en mezclas asfálticas se tiene poca información, ya que a pesar de ser un material ampliamente usado en otras áreas, no se ha estudiado su desempeño en la infraestructura vial.

En Colombia, a partir de trabajos publicados desde 1914 hasta el 2012, fueron registradas 681 especies que incluyen tanto diatomeas fósiles como actuales. Hoy en día, no existe ninguna colección especializada en diatomeas. Respecto al material depositado en colecciones, el 37% de las especies registradas se encuentran depositadas en el Museo de Ciencias Naturales de La Plata (Argentina), a partir de estadías realizadas por varios investigadores colombianos (Y. Montoya Moreno, S. Sala, A. Vouilloud N. Aguirre, & Y. Plata, 2013).

En el ámbito de los suelos, el artículo “Characterization parameters and mechanical response in diatomaceous soil depending on species” se evidencian los resultados de ensayos realizados a dos especies de diatomeas (una de origen colombiano y una de origen mexicano” tendientes a identificar la variación en la resistencia al corte, la compresibilidad y los criterios de caracterización, en función de la variación de la especie. De este estudio se concluyó que los métodos convencionales de Casagrande no son totalmente adecuados para estudiar suelos de diatomeas, en ambas especies resultó evidente la mayor relación de vacío a medida que aumentaba el contenido de Diatomeas. Adicional a esto, se encontraron altos valores de ángulo de fricción (ϕ) los cuales no son convencionales en suelos típicos de grano fino (Zuluaga, Slebi, & Caicedo).

De otro lado, las industrias de todo el mundo utilizan las diatomeas para sus diferentes procesos de producción: fundiciones metalúrgicas, lodos de perforación en pozos petroleros, perforación dirigida, pilotajes, cementos, como auxiliar filtrante de cervezas, vinos, zumos, aceites, bebidas y alimentos, así como en la fabricación de pinturas, jabones, cerámicos, materiales refractarios, abrasivos, entre otros (Tierra de diatomeas de grado alimentario).

En cuanto a investigaciones ingenieriles, se tiene un estudio del Departamento de Investigaciones de la Escuela de Ingenieros Militares, denominado “Análisis del

comportamiento físico y mecánico de mezclas de concreto hidráulico MR-37 a partir de la adición de diatomeas a diferentes dosificaciones para pavimentos rígidos”, en el cual se concluyó que la adición de diatomeas tuvo un efecto negativo en la resistencia del concreto tanto a compresión como a flexión para cilindros vigas y cubos respectivamente, por tanto no recomiendan su uso en la elaboración de concretos convencionales. (Arroyo Caycedo, Miranda Cañon, Molina Suarez, Rodriguez Martinez, Salgado Gutiérrez, & Soler Albañil, 2017).

De igual forma, en la Escuela de Ingenieros Militares, se realizó una investigación denominada “Análisis del comportamiento de una mezcla densa en caliente tipo 2 (MDC-19) en concreto asfáltico a partir de la adición de diatomeas comparado a una muestra patrón” a través de la sustitución granulométrica del material pasa tamiz No 4 (4.76 mm) por tierra de diatomeas, empleando dosificaciones al 25%, 50%, 75% y 100%, concluyendo principalmente que el comportamiento mecánico de dichos fósiles en mezclas asfálticas no es regular , por el contrario presentó una fluctuación en los resultados, especialmente en el flujo y en la estabilidad de la mezclas. No obstante, para una mezcla dosificada con un 25% en tierra de diatomeas se encontraron mejores resultados en cuanto a estabilidad y flujo con respecto a la muestra patrón. (Calceto, Hernández Bocanegra, Lizarazo Salamanca , Orjuela Ariza, Ramirez Cortes, & Sierra Sanchez, 2017)

1.2.2. Pregunta de investigación

¿Cuál es la influencia de las diatomeas usadas como filler, en el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas en comparación con una muestra patrón?

Variables del problema

Filler

Estabilidad

Flujo

Susceptibilidad al agua

2. Justificación

La mayor parte de las estructuras que se diseñan y construyen en Colombia son flexibles. De acuerdo con ASOPAC (Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia, 2004), más del 90% de las vías en el mundo están construidas en pavimento asfáltico, de las cuales un gran porcentaje poseen unas características específicas de resistencia y durabilidad que son insuficientes para soportar los niveles de tránsito alto que se presentan.

En Colombia, la red vial cuenta con alrededor de 8000 kilómetros de longitud distribuidos a lo largo y ancho del territorio nacional. Sin embargo, solo un pequeño porcentaje se encuentra en óptimas condiciones; en su gran mayoría se presentan daños que afectan el confort y la seguridad de los usuarios, además de generar innumerables costos anuales de rehabilitación y mantenimiento (Instituto Nacional de Vías).

La respuesta mecánica de una mezcla asfáltica depende de múltiples factores: asfalto, agregados y llenante mineral, este último tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas bituminosas debido a su elevada superficie específica y al aumento de la cohesión y adherencia que aporta al resto de áridos y ligante. El objetivo de este polvo mineral es rellenar los huecos del esqueleto de los áridos gruesos y finos, impermeabilizar y densificar la mezcla bituminosa (Kraemer, 2004), por lo cual, es muy importante conocer las características geométricas, composición mineralógica y volumen del filler.

Por lo anterior, es válido pensar en evaluar la interrelación de un material como las diatomeas con el asfalto, ya que teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, y su disponibilidad a nivel mundial, podría llegar a contemplarse su uso en la fabricación de mezclas asfálticas.

Las reservas mundiales de diatomita se estiman en 920 millones de toneladas, de las cuales, 250 millones se encuentran en Estados Unidos, y son equivalentes a alrededor de 460 veces la producción global actual; en el 2007 la producción fue de 2.020.000 toneladas. Los principales países productores fueron Estados Unidos de América (41%), China (21%), Dinamarca (12%), Japón (6%), Francia (4%), México (3%) y otros como Alemania, España, Chile, Rumania, República Checa y Perú, con una producción por país menor al 3% (Dolley, 2008)

En Colombia, se tienen referenciados yacimientos de diatomita en Zarzal-Obando-Cartago-La Victoria, en el Valle del Cauca; en la Laguna de La Herrera, en Cundinamarca; en Tunja-La Uvita-Chinavita-Oicatá, en Boyacá; en Nariño y en la Sabana de Bogotá y sus alrededores (Cepeda, 1978).

3. OBJETIVOS

3.2. OBJETIVO GENERAL

- Evaluar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica densa en caliente MDC-19, a partir del reemplazo de un filler de trituración por la adición de diatomeas.

3.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los agregados pétreos, asfalto y fílleres a utilizar dentro del proyecto.
- Diseñar dos tipos de mezcla asfáltica MDC-19: usando como llenante mineral material de trituración de roca y usando diatomeas.
- Evaluar la susceptibilidad a la humedad mediante ensayos de Resistencia Conservada a la Tracción Indirecta (estado húmedo y seco) para los 2 tipos de mezclas.
- Comparar los resultados y elaborar conclusiones

4. MARCOS DE REFERENCIA

4.1. MARCO LEGAL O NORMATIVO

Los ensayos se realizaron de acuerdo a las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) 2013.

- ✓ ARTÍCULO 400-13: Disposiciones Generales ejecución de obras que incluyen cemento asfáltico.
- ✓ ARTÍCULO 410-13: Suministro de Cemento Asfáltico.
- ✓ ARTÍCULO 450 - 13. Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico)

- ✓ Las normas usadas para realizar los ensayos de laboratorio son las siguientes:
 - ✓ INV E-123-13: Determinación de los tamaños de las partículas del suelo
 - ✓ INV E-125-13: Determinación del límite líquido de los suelos
 - ✓ INV E-126-13: Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos
 - ✓ INV E-121-13: Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición.
 - ✓ INV E-133-13: Equivalente de arena de suelos y agregados finos
 - ✓ INV E-218-13: Resistencia a la degradación de los agregados
 - ✓ INV E-220-13: Solidez en sulfato de Magnesio
 - ✓ INV E-224-13: Determinación de valor de 10% de finos
 - ✓ INV E-227-13: Partículas Fracturadas Agregado Grueso
 - ✓ INV E-230-13: Índice de aplanamiento y alargamiento
 - ✓ INV E-238-13: Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro-Deval
 - ✓ INV E-725-13: Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta
 - ✓ INV E-733-13. Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos.
 - ✓ INV E-748-13. Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall.

4.2. MARCO TEÓRICO

4.2.1. Agregados pétreos

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos. (Padilla Rodriguez, 2004)

Se confía que el agregado provea un fuerte esqueleto pétreo para resistir las repetidas aplicaciones de carga, independientemente del origen, métodos de procesamiento o mineralogía. Agregados de textura rugosa, de buena cubricidad, dan más resistencia que los redondeados y de textura lisa. Las partículas angulares tienden a cerrarse más apretadamente, resultando una fuerte masa de material. Las partículas redondeadas, en lugar de trabarse, propenden a deslizarse una sobre otras, a pesar de que un fragmento de agregado redondeado podría poseer similar resistencia interna de un fragmento angular (Nuñez Gavilanez, 2014)

Por esta razón, los agregados pétreos deben cumplir unos requisitos mínimos establecidos por el artículo 450 de la norma INVIAS. (Tabla 10).

4.2.2. Llenante mineral de trituración

Es también llamado Filler, es el material granular que pasa el tamiz No. 200 proveniente de trituración de roca.

Tabla 1. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua.

CARACTERÍSTICA	NORMA DE ENSAYO INV	NIVEL DE TRÁNSITO		
		NT1	NT2	NT3
Dureza, agregado grueso (O)				
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%)				
- Capa de: rodadura / intermedia / base, 500 revoluciones	E-218	25/35/- 5/7/-	25/35/35 5/7/7	25 / 35 / 35 5/7/7
- Capa de: rodadura / intermedia / base, 100 revoluciones				
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238			
- Capa de: rodadura / intermedia / base			25/30/30	20/25/25
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos, capa de: rodadura / intermedia / base	E-224			110/90/75 75/75/75
- Valor en seco, mínimo (kN)				
- Relación húmedo/seco, mínima (%)				
Coefficiente de pulimento acelerado para rodadura, mínimo	E-232	0.45	0.45	0.45
Durabilidad (O)				
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E-220	18	18	18
Limpieza, agregado grueso (F)				
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237	0.5	0.5	0.5
Limpieza, gradación combinada (F)				
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125 y E-126	NP	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo (%) (Nota 1)	E-133	50	50	50
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235	10	10	10
Geometría de las partículas, agregado grueso (F)				
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240	10	10	10
Caras fracturadas, mínimo (%)				
- Una cara: rodadura / intermedia / base	E-227	75/60/- -/ -/ -	75/75/60 60/-/-	85/75/60 70/-/-
- Dos caras: rodadura / intermedia / base				
Geometría de las partículas, agregado fino (F)				
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%)	E-239	40/35/-	45/40/35	45/40/35
- Capa de: rodadura / intermedia / base				

Fuente: Artículo 450 norma INVIAS 2013

4.2.3. Diatomeas

Las diatomeas son algas microscópicas fotosintéticas que crecen en ambientes de agua dulce o salada, pero rica en sílice disuelta. Un factor decisivo para la presencia de sílice disuelta en un cuerpo de agua es la existencia de actividad volcánica en el área. La frústula o esqueleto de las diatomeas está compuesta de sílice opalina o biogénica. Es simétrica en forma, con una gran proporción de

vacíos, decoradas con un patrón único de características del tamaño de nanómetros (poros, canales, espinas). Las formas más usuales son cilíndricas, esféricas o de disco circular; con dimensiones comprendidas entre 1 a 500 micras.

La diatomita o tierra de diatomeas es una roca sedimentaria, porosa y de bajo peso volumétrico que se forma con la acumulación y compactación de las frústulas de diatomeas. La diatomita es inerte, con una composición de aproximadamente 90% de sílice y el resto son óxidos de hierro y aluminio. Tiene una gran capacidad de absorción y una extensa área superficial (Díaz Rodríguez, 2011). La diatomita posee propiedades físicas y químicas que permiten aplicaciones imposibles en otro tipo de material de composición silíceas; se distingue por su baja densidad, gran porosidad, alto poder de absorción y excelente capacidad filtrante (Manosalva Sanchez & Naranjo Merchán, 2009).

✓ **Diatomeas de la especie *Aulacoseira granulata***

Esta especie crece en sustrato lodoso, sobre y alrededor de vegetación acuática sumergida. Vive en lagos, estanques y ríos, en ambientes de agua dulce, con concentraciones de sal muy restringidas. El pH se sitúa entre 6,3 y 9, en ambientes con alta concentración de nutrientes (eutrófica) y temperaturas entre 15 y 30 °C. En general, la *Aulacoseira granulata* tiene una distribución muy amplia; en Europa la reportan mucho en lagos profundos, mientras que en Colombia se ha encontrado más en lagos relativamente someros (Manosalva Sanchez & Naranjo Merchán, 2009)

4.2.4. Asfalto

Es un material derivado del petróleo con una gran cantidad de componentes hidrocarburos. Normalmente son hidrocarburos pesados, solubles, de color oscuro, y pueden ser líquidos o sólidos. El asfalto es un material con comportamiento visco elástico dependiendo de la temperatura en la que se encuentre. A temperaturas bajas se comporta como un material sólido (elástico) y a medida que la temperatura se incrementa presenta comportamiento fluido (viscoso).

✓ **Asfalto normalizado 40-50**

El término “normalizado” hace referencia al proceso industrial al cual se somete el ligante proveniente de la refinería, para lograr el cumplimiento de especificaciones

y obtener una característica de penetración comprendida entre 40 y 50 mm/10.

El uso principal de estos asfaltos de penetración es la construcción y conservación de carreteras, en capas intermedias y de rodadura para zonas con temperatura mayor a 15°C y niveles de tránsito NT3, según indicaciones del Art.450 de INVIAS

4.2.5. Mezcla asfáltica en caliente

Es un material vial compuesto por 2 elementos: agregados pétreos y ligante asfáltico. Este último actúa como un agente ligante que aglutina las partículas en una masa cohesiva, mientras que los agregados, ligados por el material asfáltico, actúan como un esqueleto que aporta resistencia y rigidez al sistema.

Se denomina “mezcla asfáltica en caliente” pues para lograr que los áridos se mezclen homogéneamente con el asfalto, ambos componentes se llevan a temperaturas altas, sobre los 100°C, para obtener una buena trabajabilidad de la mezcla, teniendo en cuenta que su comportamiento es afectado por las propiedades individuales de cada componente y la interrelación de aquellos dentro del sistema.

Propiedades de las mezclas asfálticas.

- ✓ **Durabilidad:** Propiedad de la mezcla que hace que el pavimento sea capaz de resistir la desintegración debido al tránsito y al clima. Éste último, afecta principalmente al asfalto de la capa superficial por estar en contacto con el sol, el aire y el agua, pues produce que este material, pierda las propiedades aglutinantes, se oxide, se endurezca y envejezca afectando la vida útil del pavimento.
- ✓ **Estabilidad:** Se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir las cargas de tránsito sin que se produzcan deformaciones. Esta propiedad depende de la cohesión de la mezcla y de la fricción interna. La fricción interna es aportada por el material pétreo y depende del tamaño del árido y de la rugosidad de sus caras. Las mezclas con materiales más gruesos y de caras angulosas tendrán mayor estabilidad que mezclas con materiales finos. La pérdida de estabilidad en un pavimento se traduce en ahuellamientos y ondulaciones.
- ✓ **Flexibilidad:** Capacidad de la mezcla de adaptarse a las deformaciones

por asentamientos de la base y subrasante sin agrietarse.

- ✓ **Resistencia a la fatiga:** Capacidad del pavimento asfáltico de soportar esfuerzos provocados por el tránsito en repetidas pasadas.
- ✓ **Impermeabilidad:** Las mezclas deben ser en lo posible totalmente impermeables, de manera que el agua superficial no pueda atravesar hacia las capas inferiores, evitando con ello que éstas puedan perder capacidad de soporte.
- ✓ **Resistencia al deslizamiento:** Capacidad del pavimento asfáltico de ofrecer resistencia al deslizamiento, especialmente cuando está húmedo.
- ✓ **Trabajabilidad:** se refiere a la capacidad que tenga la mezcla de colocarse y compactarse con facilidad.

4.2.6. Mezcla Asfáltica en caliente tipo MDC-19

Es una mezcla de tipo continuo, es decir, posee una cantidad muy distribuida de diferentes tamaños de agregado pétreo en el huso granulométrico. Su tamaño máximo es $\frac{1}{2}$ ". El contenido de vacíos oscila entre el 4% y 6%.

✓ **Diseño**

El método Marshall se emplea para dosificar mezclas en caliente de agregados pétreos y cemento asfáltico con o sin la adición de llenante mineral. El método puede utilizarse tanto para diseños en laboratorio como para controles de campo. El objetivo del diseño de una mezcla asfáltica es determinar la proporción adecuada de cemento asfáltico en la mezcla, que asegure que está presente:

- ✓ Suficiente estabilidad como para satisfacer las exigencias del servicio sin desplazamientos o distorsiones.
- ✓ Suficiente asfalto para asegurar la obtención de un pavimento durable que resulte del recubrimiento completo de las partículas de agregado pétreo, impermeabilizando y ligando las mismas entre sí, bajo una compactación adecuada.
- ✓ Suficiente trabajabilidad para permitir una eficiente colocación de la mezcla con que se pavimentará, sin que se produzca segregación.

- ✓ Suficientes vacíos con aire en la mezcla compactada, para proveer una reserva de espacio que impida exudaciones y pérdidas de estabilidad al producirse una pequeña compactación adicional bajo las cargas del tránsito, como los posibles aumentos de volumen del asfalto a altas temperaturas.

En general, el método emplea muestras normales para ensayos de 2-1/2" de altura por 4 de diámetro, las cuales se preparan siguiendo un procedimiento especificado para calentar, mezclar y compactar las mezclas de agregados y cemento asfáltico.

Las dos características principales del ensayo son un análisis de densidad-vacíos y una prueba de estabilidad-flujo. La estabilidad es la máxima resistencia a la carga que la muestra normal soporta 60°C cuando se ensaya la probeta, mientras que el flujo es la deformación total que se produce en la muestra, desde la carga cero hasta la carga máxima.

✓ **Granulometría.**

La metodología Marshall utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en la ordenada se encuentran el porcentaje de material que pasa cierta malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm, graficadas en forma logarítmica.

La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior).

Para prevenir segregaciones y garantizar los niveles de compactación y resistencia exigidos por la norma INVIAS 2014, el material usado deberá dar lugar a una curva granulométrica uniforme, sensiblemente paralela a los límites de la franja por utilizar, sin saltos bruscos de la parte superior de un tamiz a la inferior del tamiz adyacente y viceversa (Tabla 2).

✓ **Material bituminoso.**

El tipo de asfalto para elaborar la mezcla en caliente será seleccionado en función de:

- Características climáticas de la zona

- Tipo de capa
- Condiciones de operación de la carretera

Tabla 2. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua

TIPO DE MEZCLA		TAMIZ (mm / U.S. Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.00	0.425	0.180	0.075
		1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 80	No. 200
		% PASA									
DENSE	MDC-25		100	80-95	67-85	60-77	43-59	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-19			100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17	4-8
	MDC-10					100	65-87	43-61	16-29	9-19	5-10
SEMIDENSE	MSC-25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
	MSC-19			100	80-95	65-80	40-55	24-38	9-20	6-12	3-7
GRUESA	MGC-38	100	75-95	65-85	47-67	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
	MGC-25		100	75-95	55-75	40-60	28-46	17-32	7-17	4-11	2-6
ALTO MÓDULO	MAM -25		100	80-95	65-80	55-70	40-55	24-38	10-20	8-14	6-9
TOLERANCIAS EN PRODUCCIÓN SOBRE LA FÓRMULA DE TRABAJO (±)		-	4 %					3 %			2 %

Fuente: Artículo 450 Norma INVIAS 2013

✓ Diseño preliminar.

Cuando se realiza una mezcla de diseño, es frecuentemente necesario hacer varias mezclas de prueba para encontrar una que cumpla con todos los criterios de diseño (Tabla 3). Cada una de las mezclas de prueba sirve como una guía para evaluar y ajustar las pruebas siguientes. Para diseño de mezclas preliminares, es aconsejable comenzar con una graduación de agregado que se acerque a la media de los límites establecidos. Las mezclas de prueba iniciales sirven para establecer la fórmula de trabajo y verificar que la graduación de agregado dentro de los límites especificados puede ser reproducida en una planta mezcladora.

Cuando las mezclas de pruebas iniciales fallan con los criterios de diseño en cualquier contenido de asfalto seleccionado, será necesario modificar o, en algunos casos, rediseñar la mezcla. Para corregir una deficiencia, la manera más fácil de rediseñar una mezcla es cambiar la gradación de los agregados ajustando los porcentajes utilizados. Frecuentemente este ajuste es suficiente para cumplir con las especificaciones. Si el ajuste de los porcentajes no es suficiente, se

deberán realizar serias consideraciones.

Tabla 3. Diseño preliminar mezcla asfáltica

CARACTERÍSTICA		NORMA ENSAYO INV	MEZCLAS DENSAS, SEMIDENSAS Y GRUESAS			MEZCLA DE ALTO MÓDULO
			CATEGORÍA DE TRÁNSITO			
			NT1	NT2	NT3	
Compactación (golpes/cara)		E-748 (E-800) (Nota 1)	50	75 (112)	75 (112)	75
Estabilidad mínima (N)			5,000	7,500 (16,875)	9,000 (33,750)	15,000
Flujo(mm) (Nota 2)			2.0 a 4.0	2.0 a 4.0 (3.0 a 6.0)	2.0 a 3.5 (3.0 a 5.3)	2.0 a 3.0
Relación Estabilidad / Flujo (kN/mm)			2.0 a 4.0	3.0 a 5.0 (4.5 a 7.5)	3.0 a 6.0 (4.5 a 9.0)	-
Vacíos con aire (V _a),% (Nota 3)	Rodadura	E-736	3.0 a 5.0	3.0 a 5.0	4.0 a 6.0	NA
	Intermedia	o	4.0 a 8.0	4.0 a 7.0	4.0 a 7.0	4.0 a 6.0
	Base	E-799	NA	5.0 a 8.0	5.0 a 8.0	4.0 a 6.0
Vacíos en los agregados minerales (VAM), % mínimo	T. Máx. 38 mm	E-799	13.0			-
	T. Máx. 25 mm		14.0			14.0
	T. Máx. 19 mm		15.0			-
	T. Máx. 10 mm		16.0			-
Vacíos llenos de asfalto (VFA), %		E-799	65 a 80	65 a 78	65 a 75	63 a 75
Relación Llenante / Ligante efectivo, en peso		E-799	0.8 a 1.2			1.2 a 1.4
Concentración de llenante, valor máximo		E-745	Valor crítico			
Evaluación de propiedades de empaquetamiento por el método Bailey		-	Reportar			
Espesor promedio de película de asfalto, mínimo µm		E-741	7.5			

Fuente: Elaboración propia

5. ENSAYOS A EVALUAR

5.1. Estabilidad y flujo (INV E-748-13)

Este ensayo sirve para determinar la resistencia a la deformación plástica de especímenes de mezclas asfálticas para pavimentación. Se fabrican especímenes de forma cilíndrica de 102 mm (4") de diámetro y una altura nominal de 63.5 mm (2 ½"), se someten a curado en baño de agua o en un horno, y luego a carga en la

prensa Marshall bajo condiciones normalizadas, determinándose su estabilidad y su deformación (flujo). Este ensayo se debe realizar dentro de las 24 horas siguientes a la compactación de las probetas (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS, 2013)

5.2 Ensayo de Resistencia Conservada a la Tracción Indirecta

El ensayo de tracción indirecta, destaca por ser un método simple y representativo, que permite imitar la respuesta de un pavimento flexible y obtener la carga máxima que aguanta una mezcla antes de romper, el cual se realiza conforme a lo establecido en la norma I.N.V.E-725 del 2013. Este ensayo consiste en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, igual a la definida en el ensayo Marshall, aplicando una carga de manera uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la roturas de romper.

Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y desencadena la rotura. La probeta es cargada a compresión según un plano diametral vertical de la misma. Para poder cargar la probeta a compresión en un plano diametral vertical, se requiere un dispositivo de sujeción de la probeta a través del cual se materialice dicho plano de carga. Como parte de este dispositivo, y en contacto directo con dos generatrices diametralmente opuestas de la probeta, existen dos elementos encargados de evitar la rotura local de la probeta durante el ensayo.

Como la respuesta del material es altamente dependiente de la temperatura, la temperatura será una variable más para el ensayo. El ensayo de tracción indirecta tiene validez para materiales de comportamiento fundamentalmente elástico y lineal. La norma indica el uso de una temperatura de 25 ± 1 °C, pero permite el uso de otras temperaturas para analizar la susceptibilidad térmica de la mezcla en estudio y sugiere que no se utilicen temperaturas superiores al punto de reblandecimiento del ligante por ser predominante el carácter viscoso de las mezclas. (Garrote Villar).

6. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo la comparación entre Mezcla asfáltica Densa en Caliente MDC-19 convencional (con filler procedente de trituración de roca) y Mezcla asfáltica Densa en Caliente con adición de diatomeas (en reemplazo del filler de trituración de roca), se presenta inicialmente la caracterización de materiales granulares y del asfalto como se muestra a continuación.

6.1 MATERIALES

6.1.1. Materiales granulares

Provenientes del Alto de Gualanday. Formación geológica abanico de Ibagué. Cantos de rocas extrusivas e intrusivas en matriz arenácea y areno-tobácea. Depósito de lahares, aluviales, glaciares, aluvio-torrenciales y flujos piroclásticos. Este material fue triturado y clasificados mediante trituración terciaria así: Triturado pasa 3/4" retenido 3/8" y arena pasa 3/8".

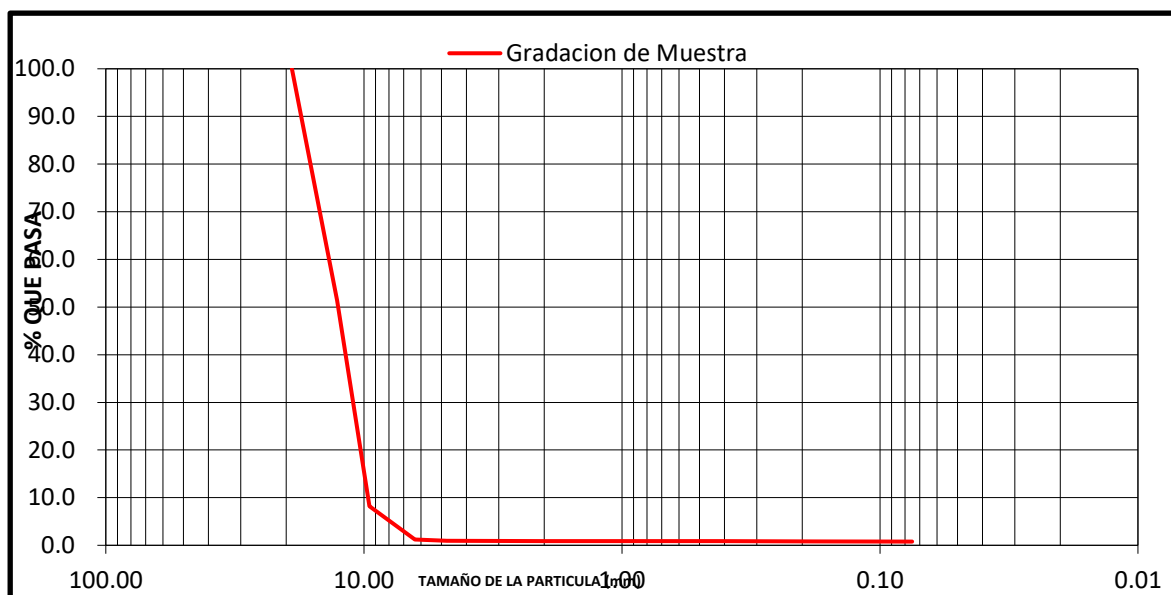
✓ Triturado pasa 3/4"

Tabla 4. Resultados del tamizaje Triturado pasa 3/4"

GRADACION				
P1=	2.654,0	P2=	2.654,0	
Tamiz	Tamiz mm	Peso Ret.	% Retenido	% Pasa
3/4"	19,00	0,0	0,0	100,0
1/2"	12,70	1.289,8	48,6	51,4
3/8"	9,51	1.146,5	43,2	8,2
1/4"	6,34	185,5	7,0	1,2
Nº 4	4,76	7,6	0,3	0,9
Nº 10	2,00	0,7	0,0	0,9
Nº 40	0,425	0,8	0,0	0,9
Nº 80	0,180	0,8	0,0	0,8
Nº 200	0,075	1,6	0,1	0,8
P 200	0,000	20,7	0,8	0,0

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 1. Curva de distribución granulométrica Triturado pasa 3/4"



Fuente: Elaboración propia

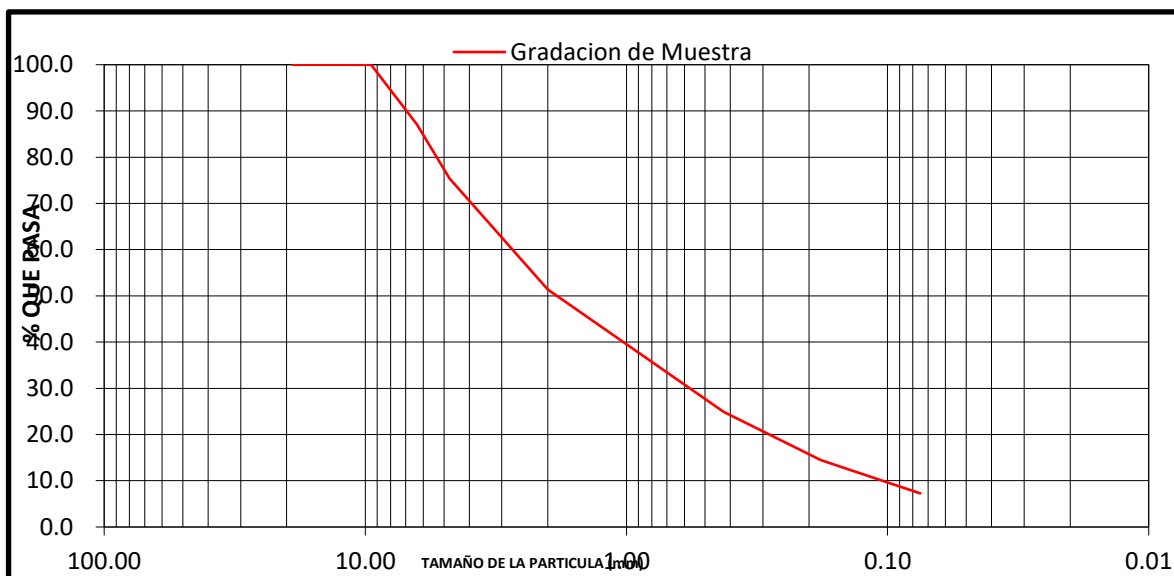
✓ Arena triturada pasa 3/8"

Tabla 5. Resultados del tamizaje Arena pasa 3/8"

GRADACION				
P1=	2.877,0	P2=	2.669,9	
Tamiz	Tamiz mm	Peso Ret.	% Retenido	% Pasa
3/4"	19,00	0,0	0,0	100,0
1/2"	12,70	0,0	0,0	100,0
3/8"	9,51	0,0	0,0	100,0
1/4"	6,34	371,1	12,9	87,1
Nº 4	4,76	336,6	11,7	75,4
Nº 10	2,00	690,5	24,0	51,4
Nº 40	0,425	762,4	26,5	24,9
Nº 80	0,180	300,5	10,4	14,5
Nº 200	0,075	206,5	7,2	7,3
P 200	0,000	2,3	7,3	0,0

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 2. Curva de distribución granulométrica Arena pasa 3/8"



Fuente: Elaboración propia

Se realizaron todos los ensayos requeridos por la especificación 450 de la norma INVIAS, y los resultados se muestran en la tabla 6.

✓ **Llenante Mineral**

Proveniente de la trituración de agregados. Se realizaron el ensayo de densidad Bulk del llenante mineral en kerosene arrojando como resultado 0.74 g/ml, y el ensayo de peso específico arrojando como resultado un peso específico aparente de 2.713.

✓ **Granulometría de agregados combinados**

La granulometría del agregado obtenido mediante la combinación de materiales, corresponde a una mezcla tipo MDC-19. La proporción utilizada para cumplir con tal gradación se indica a continuación:

- 22.5% Grava triturada pasa 3/4" retenida 3/8"
- 77.5% Arena triturada pasa 3/8"

Tabla 6. Resultados del tamizaje Granulometría de agregados combinados

GRADACION						
P1=	3.687,0	P2=	3.476,9		ESPECIFICACION	
Tamiz	Tamiz mm	Peso Ret.	% Retenido	% Pasa	MDC-19	
3/4"	19,00	0,0	0,0	100,0	100	100
1/2"	12,70	401,4	10,9	89,1	80	95
3/8"	9,51	362,7	9,8	79,3	70	88
1/4"	6,34	422,4	11,5	67,8		
Nº 4	4,76	341,7	9,3	58,6	49	65
Nº 10	2,00	684,5	18,6	40,0	29	45
Nº 40	0,425	755,1	20,5	19,5	14	25
Nº 80	0,180	297,4	8,1	11,4	8	17
Nº 200	0,075	208,6	5,7	5,8	4	8
P 200	0,000	3,1	5,8	0,0	0	0

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 3. Curva de distribución granulométrica agregados combinados.

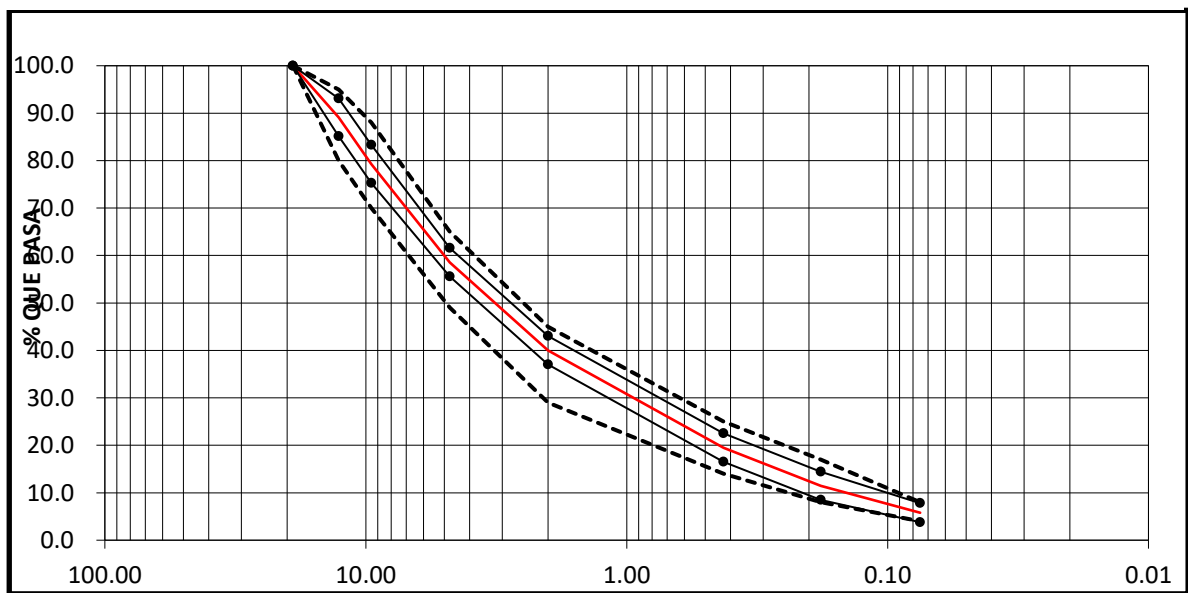


Tabla 7. Caracterización de agregados pétreos gruesos y finos


CARACTERÍSTICA	RESULTADO DE LABORATORIO	CUMPLE
Dureza		
Desgaste en la máquina de los ángeles, 500 revoluciones (%)	24,8	SI
Desgaste en la máquina de los ángeles, 100 revoluciones (%)	4,7	SI
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval (%)	14,9	SI
Resistencia mecánica por el método de 10% de finos	97	SI
Coefficiente de pulimento acelerado	0,5	SI
Durabilidad		
Pérdidas en el ensayo de solidez en sulfato de magnesio Agregado grueso	2,4	SI
Pérdidas en el ensayo de solidez en sulfato de magnesio Agregado fino(%)	1,7	SI
Limpieza		
Impurezas en agregado grueso (%)	0,5	SI
Limpieza, gradación combinada		
Índice de Plasticidad (%)	NP	SI
Equivalente de arena (%)	70	SI
Geometría de las partículas		
Partículas planas y alargadas, relación 5:1 (%)	1,7	SI
Caras fracturadas Una cara - Dos caras (%)	100	SI
Geometría de las partículas, agregado fino		
Angularidad de la fracción fina (%)	47,8	SI
Adhesividad		
* Agregado grueso: Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo (%)	100	SI
* Agregado fino: Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método Riedel - Weber)	6	SI

Fuente: Elaboración propia

6.1.2. Cemento asfáltico 40-50

Se utilizó cemento asfáltico 40-50 normalizado. El término normalizado hace referencia al proceso industrial al cual se somete el ligante proveniente de la refinera, para lograr el cumplimiento de las especificaciones y obtener una característica de penetración comprendida entre 40 y 50 mm/10 suministrado por Manufacturas y Procesos Industriales MPI. El uso principal de estos asfaltos es la construcción y conservación de carreteras, en capas intermedias y de rodadura para zonas con temperatura mayor a 15°C y niveles de tránsito NT3. Los resultados de los ensayos realizados al ligante se muestran a continuación en el reporte de calidad de este asfalto.

Ilustración 4. Reporte de calidad del asfalto

 Manufacturas y Procesos Industriales Ltda. <small>Industria de la Construcción y el Pavimento</small>	R DT 09	MANUAL DE PROCEDIMIENTOS E INSTRUCTIVOS			
	N.R: 12 2015-04-29	REPORTE DE CALIDAD DE ASFALTOS DE PENETRACION			

FECHA : _____	LOTE No. _____
CLIENTE : _____	DESPACHO No. _____
TIPO DE ASFALTO: _____	

PROPIEDAD	NORMA DE REFERENCIA I.N.V.	ESPECIFICACION		REPORTE DE CONTROL DE CALIDAD	FRECUENCIA DE ENSAYO
		MIN	MAX		
Penetración @ 25°C, 100 gr, 5 seg. (mm/10)	E-708	40	50	48	LOTE
Punto de ablandamiento, (°C)	E-712	52	58	52,8	LOTE
Índice de Penetración (IP)	E-724	-1,2	+0,6	-0,62	LOTE
Viscosidad Absoluta @60°C (P)	E-716	2000	—	3508	LOTE
Viscosidad Brookfield @ 60°C (P)					
Aguja 27, Torque >90%	E-717	2000	—	3385	LOTE
Pérdida por Calentamiento Película Delgada en mov. @ 163°C, 85 min (%)	E-720	—	0,8	0,32	SEMANAL
Ductilidad @ 25°C, 5 cm / min, (cm)	E-702	80	—	124,8	QUINCENAL
Peso Específico	E-707	—	—	1,016	MENSUAL
Punto de Chispa, (°C)	E-709	240	—	304	LOTE
Solubilidad en Tricloroetileno, (%)	E-713	99	—	99,55	SEMESTRAL
Contenido de agua, (%)	E-704	—	0,2	6,00	TRIMESTRAL
Penetración del residuo después de la pérdida por calentamiento, % de la penetración original	E-706	55	—	62,5	SEMANAL
Incremento en el Punto de Ablandamiento después de pérdida por calentamiento en película delgada, °C	E-712	—	8	6,4	SEMANAL
Índice de envejecimiento relación de viscosidades a 60°C del asfalto residual y el asfalto original (%)	E-717	—	4	3,1	SEMANAL

Fuente: Manufacturas y Procesos Industriales MPI

7. ELABORACIÓN DE DISEÑO MDC-19 CON FILLER PROVENIENTE DE TRITURACIÓN DE ROCA

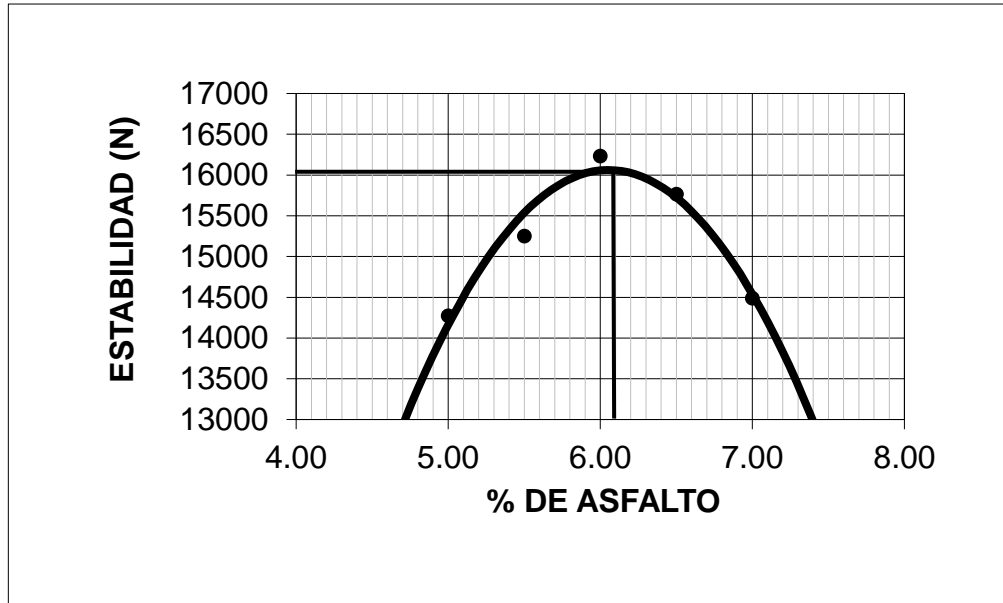
7.1. Diseño Preliminar

Se elaboraron 4 probetas para cada punto de asfalto, variando entre 5% y 7% de asfalto, cada 0.5%, con el fin de determinar el contenido óptimo de asfalto para la combinación de agregados ya establecida.

Tabla 8. Diseño Marshall MDC-19 con filler proveniente de trituración

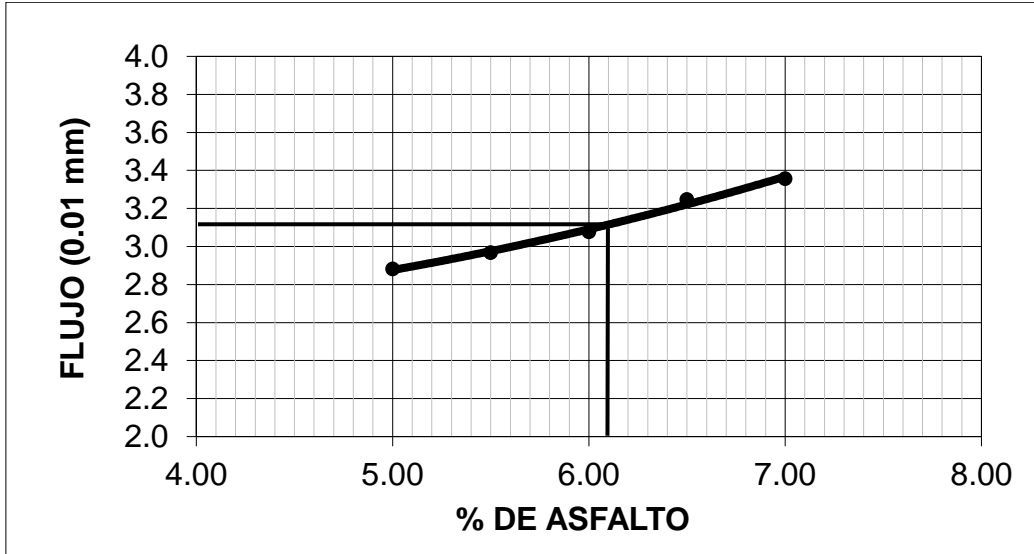
TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA				MDC-19				PESO ESPECIFICO BULK DE LOS AGREGADOS :										2,587	
TIPO DE ASFALTO :				40 - 50 MPI				PESO ESPECIFICO DEL ASFALTO :										1,015	
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN				145 °C				TRAMO DE INSTALACIÓN N/A											
								ABSCISA INICIAL N/A										ABSCISA FINAL N/A	
N.º Muestra	PROBETA No.	x DE ASFALTO	ESPESOR PROBETA cm	PESO PROBETA EN GRAMOS			PESO ESPECIFICO MEZCLA			ASFALTO ABSORBIDO x	VOLUMEN - x TOTAL			VACIOS EN AGREGADOS MINERALES	x DE ASFALTO EFECTIVO	x VACIOS LLENOS DE ASFALTO	ESTABILIDAD, (Kg)		FLUJO 0,01mm
				SECA EN AIRE	SSS EN AIRE	EN AGUA	BULK	MAXIMO TEORICO	MAXIMO MEDIDO		AGREGADOS	VACIOS CON AIRE	ASFALTO EFECTIVO				MEDIDA	CORREGIDA	
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s
MUESTRA No 1	1	5,00	6,4	1199,0	1199,2	676,3	2,293										13700	13700	2,9
	2		6,6	1187,8	1187,9	671,2	2,299										15050	13997	2,8
	3		6,4	1198,4	1198,5	676,8	2,297										14830	14830	2,9
	4		6,6	1187,2	1187,3	671,4	2,301										15670	14573	3,0
	Promedio						2,298	2,401	2,463	1,103	84,4	6,7	8,9	15,6	4,0	57,0		14275	2,9
MUESTRA No 2	5	5,50	6,4	1193,8	1195,8	680,0	2,314										15300	15300	2,9
	6		6,3	1200,8	1203,4	682,2	2,304										15500	15500	3,1
	7		6,4	1192,0	1194,0	678,1	2,311										15200	15200	3,0
	8		6,5	1186,1	1188,8	675,0	2,308										15640	15014	2,9
	Promedio						2,309	2,384	2,439	1,003	84,4	5,3	10,3	15,6	4,6	66,0		15254	3,0
MUESTRA No 3	9	6,00	6,4	1182,1	1185,3	675,4	2,318										16250	16250	2,9
	10		6,5	1189,8	1192,7	679,1	2,317										17070	16387	3,1
	11		6,4	1186,5	1187,1	675,5	2,319										16050	16050	3,2
	12		6,5	1186,3	1187,8	675,4	2,315										16930	16253	3,1
	Promedio						2,317	2,367	2,431	1,185	84,2	4,7	11,1	15,8	4,9	70,4		16235	3,1
MUESTRA No 4	9	6,50	6,3	1192,5	1192,8	678,6	2,319										15300	15300	3,5
	10		6,4	1194,1	1194,3	678,7	2,316										16100	16100	3,4
	11		6,4	1198,7	1198,9	681,8	2,318										16100	16100	3,1
	12		6,5	1180,9	1181,5	671,2	2,314										16220	15571	2,9
	Promedio						2,317	2,350	2,419	1,297	83,7	4,2	12,0	16,3	5,3	73,9		15768	3,2
MUESTRA No 5	13	7,00	6,4	1185,0	1185,2	670,2	2,301										14400	14400	3,5
	14		6,5	1184,6	1185,1	671,8	2,308										14800	14208	3,4
	15		6,5	1186,4	1186,6	672,6	2,308										15400	14784	3,4
	16		6,5	1194,0	1194,2	675,5	2,302										15170	14563	3,1
	Promedio						2,305	2,334	2,385	0,981	82,9	3,4	13,8	17,1	6,1	80,4		14489	3,4

Ilustración 5. Estabilidad (N) - Contenido de asfalto (%). MDC-19



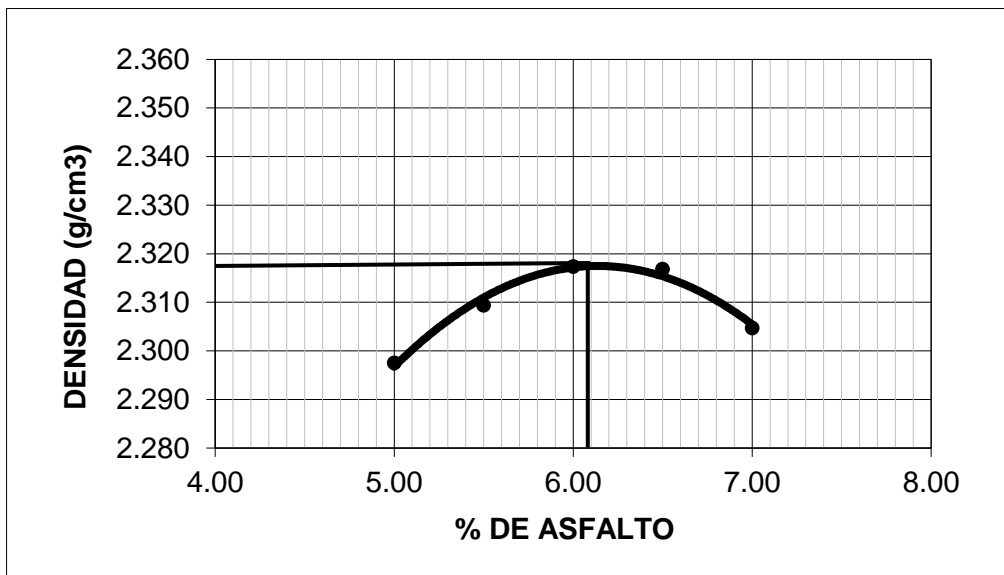
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 6. Flujo - Contenido de asfalto (%). MDC-19



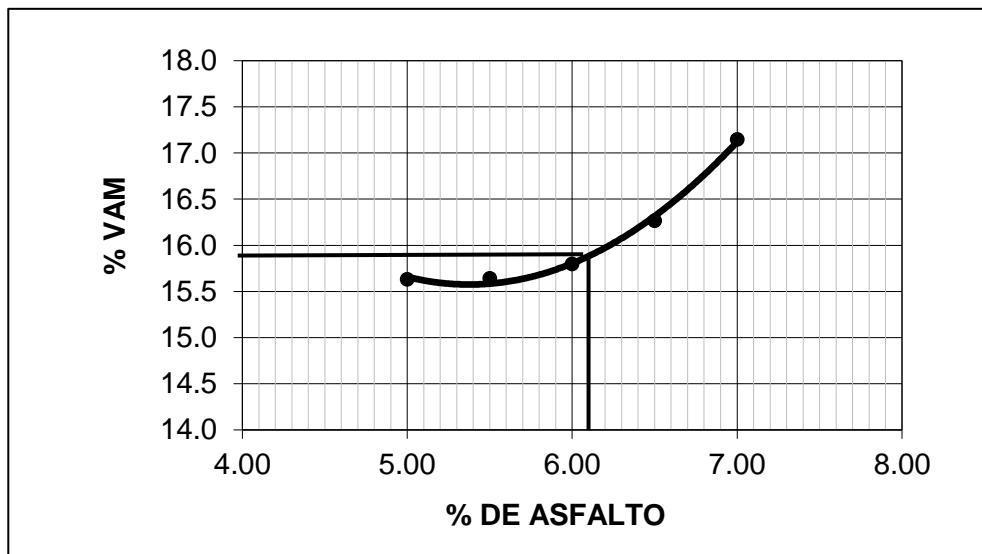
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 7. Densidad (g/cm³) - Contenido de asfalto (%). MDC-19



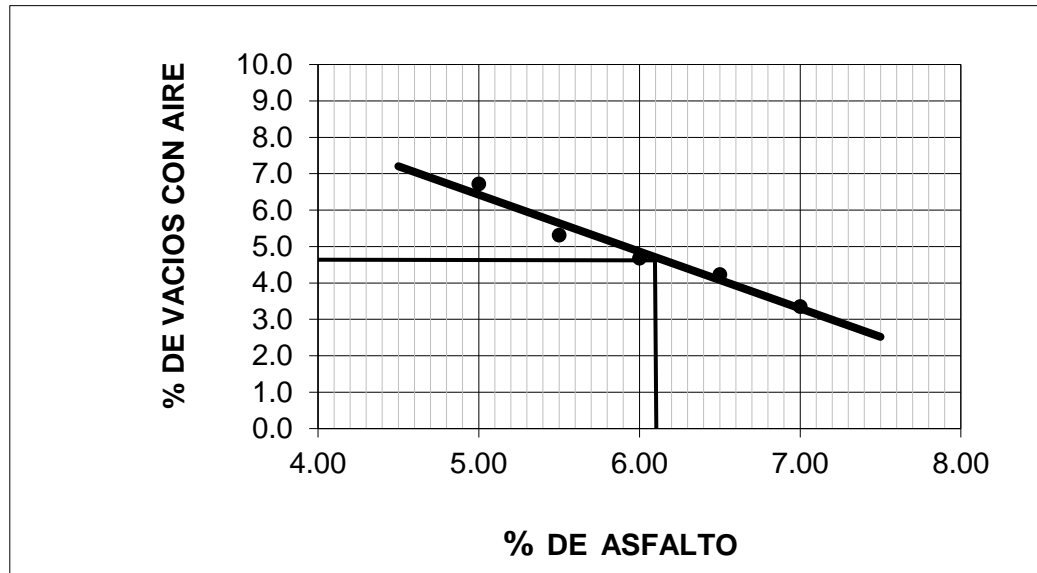
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 8. Porcentaje de vacíos en los agregados minerales (%) - Contenido de asfalto (%). MDC-19



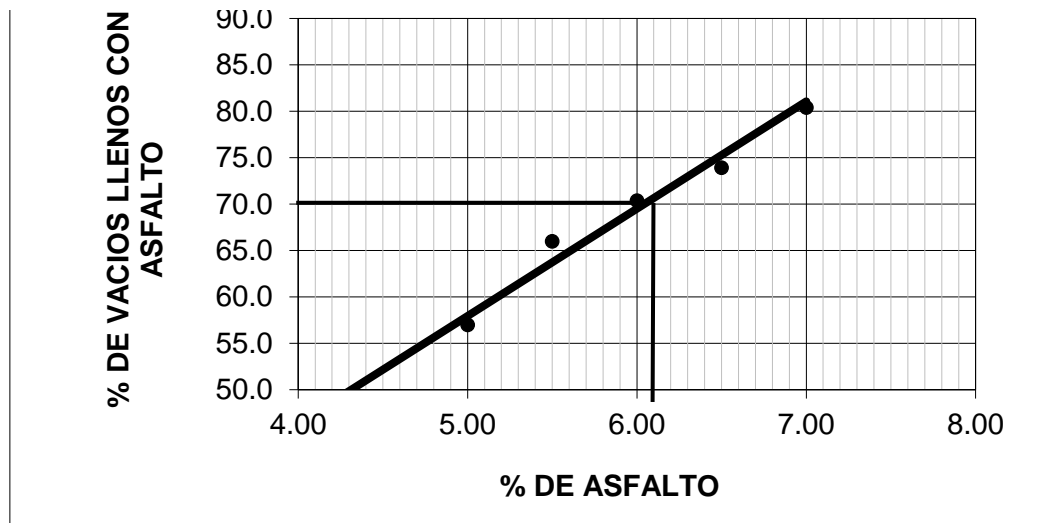
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 9. Contenido de vacíos con aire (%) - Contenido de asfalto (%).
MDC-19



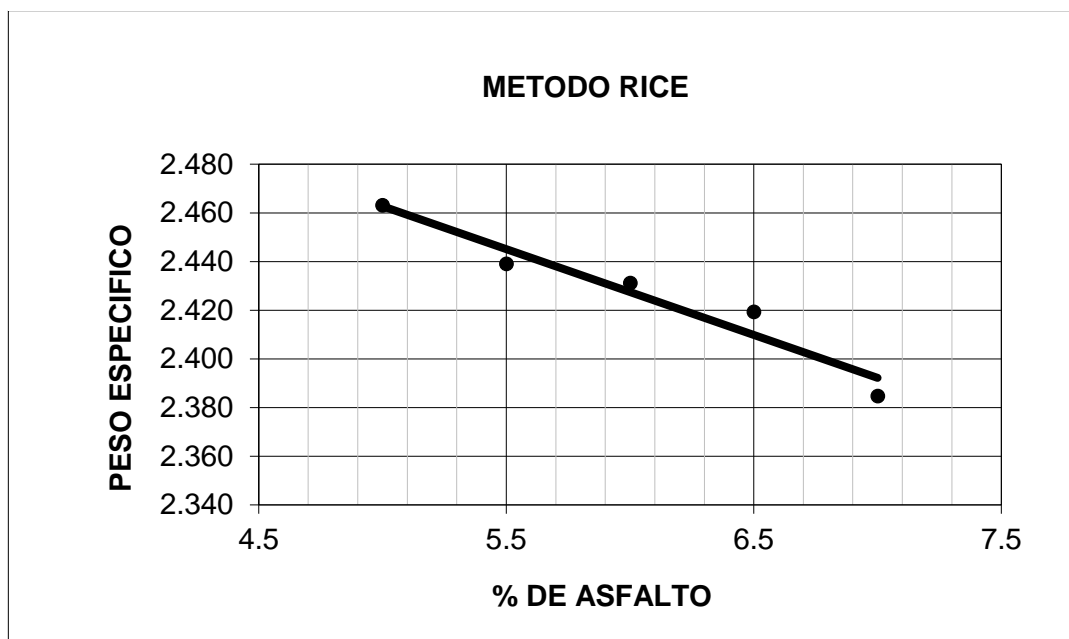
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 10. Vacíos llenos de asfalto (%) - Contenido de asfalto (%).MDC-19



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 11. Método RICE. MDC-19



Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Resultados método RICE

	CONTENIDO DE ASFALTO	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
A	Peso molde vacío	0	0	0	0	0
B	Peso molde con agua y tapa	7381	7381	7381	7381	7381,0
C	Peso molde con material	1500	1500	1500	1500	1500
D	Peso material (C-A)	1500	1500	1500	1500	1500
E	Peso molde con material agua y tapa	8269	8266	8260	8254	8248
F	Volumen D-(E-B)	612	615,0	621,0	627,0	633,0
G	Densidad D/F	2,451	2,439	2,415	2,392	2,370

Fuente: Elaboración propia

Luego de analizar las respectivas curvas, se obtiene la fórmula de trabajo mostrada en la tabla 9.

Tabla 10. Fórmula de trabajo MDC-19 con filler de trituración de roca

	Especificación	Diseño For. Trab.	CUMPLE
Asfalto	según/formula	6,1%	SI
Vacios en agregados minerales	>15.0 %	15,9%	SI
Peso unitario		2,318	SI
Vacios llenos de asfalto	65 – 75	70	SI
Vacios con aire	4 – 6	4,8%	SI
Estabilidad (N)*	>9000	16000	SI
Flujo (mm) **	2,0 – 3,5	3,1	SI
Relacion Llenante / Ligante	0,8 - 1,2	1,16	SI
Relacion Estabilidad y flujo KN/mm	3,0 - 6,0	5,2	SI

Fuente: Elaboración propia

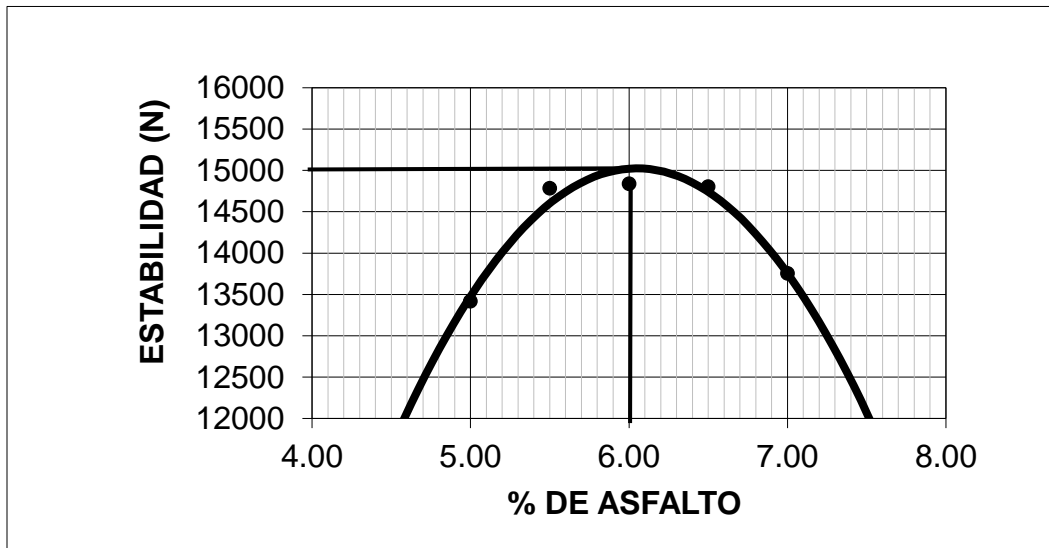
8. ELABORACIÓN DE DISEÑO MDC-19 CON ADICIÓN DE DIATOMEAS EN REEMPLAZO DEL FILLER DE TRITURACIÓN DE ROCA.

Luego de tener definidos los porcentajes de cada fracción de agregado para el diseño de mezcla MDC-19 con filler de trituración de roca, se realiza el reemplazo de la porción de filler (5.8%)por una adición de diatomeas, y se calculan nuevamente todos los parámetros exigidos por el artículo 450 de la norma INVIA.

Tabla 11. Diseño Marshall MDC-19 con diatomeas

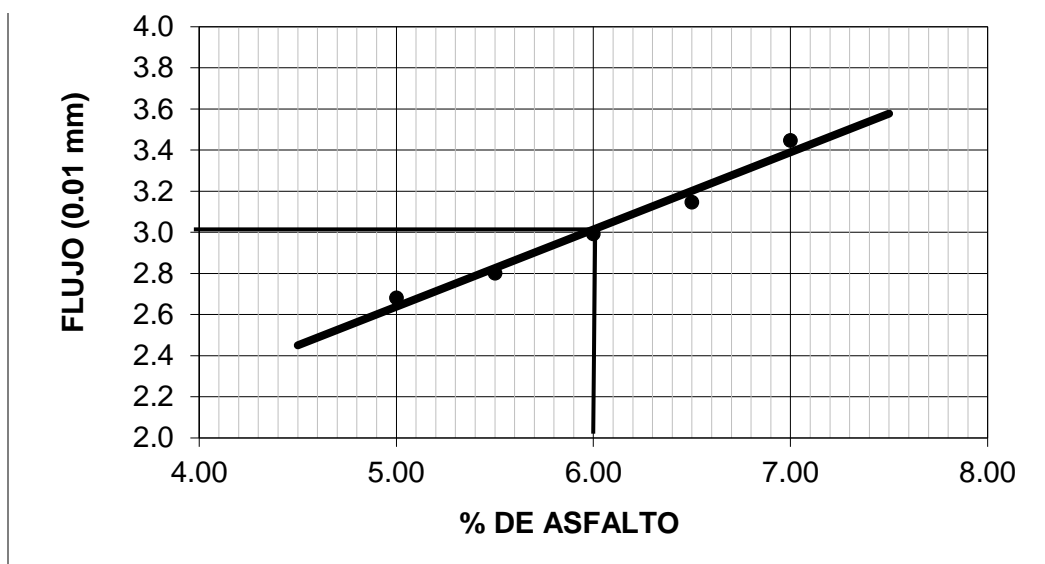
TIPO DE MEZCLA ASFÁLTICA				MDC-19																
				PESO ESPECIFICO BULK DE LOS AGREGADOS : 2,594																
				PESO ESPECIFICO DEL ASFALTO : 1,015																
TIPO DE ASFALTO :				40 - 50 MPI																
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN				145 °C																
				TRAMO DE INSTALACIÓN N/A																
				ABSCISA INICIAL N/A																
				ABSCISA FINAL N/A																
N° Muestra	PROBETA No.	X DE ASFALTO	ESPESOR PROBETA cm	PESO PROBETA EN GRAMOS			PESO ESPECIFICO MEZCLA			ASFALTO ABSORBIDO %	VOLUMEN - X TOTAL			VACIOS EN AGREGADOS MINERALES	X DE ASFALTO EFECTIVO	X VACIOS LLENOS DE ASFALTO	ESTABILIDAD, (Kg)		FLUJO 0,01mm	
				SECA EN AIRE	SSS EN AIRE	EN AGUA	BULK	MAXIMO TEORICO	MAXIMO MEDIDO		AGREGADOS	VACIOS CON AIRE	ASFALTO EFECTIVO				MEDIDA	CORREGIDA		
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	
MUESTRA No 1	1	5,00	6,50	1201,9	1202,6	676,3	2,284										14310	13738	2,7	
	2		6,60	1200,6	1201,2	674,6	2,280										14450	13439	2,6	
	3		6,50	1201,5	1201,8	674,1	2,277										13790	13238	2,7	
	4		6,60	1200,5	1201,1	675,1	2,282										14250	13253	2,7	
	Promedio						2,281	2,407	2,451	0,789	83,5	6,9	9,5	16,5	4,3	57,8		13417	2,7	
MUESTRA No 2	5	5,50	6,50	1200,0	1201,0	680,2	2,304										15460	14842	2,8	
	6		6,50	1199,6	1200,0	679,1	2,303										15500	14880	2,9	
	7		6,40	1199,8	1200,5	679,8	2,304										15020	15020	2,8	
	8		6,50	1197,7	1202,1	681,9	2,302										14990	14390	2,8	
	Promedio						2,303	2,390	2,439	0,898	83,9	5,6	10,5	16,1	4,7	65,4		14783	2,8	
MUESTRA No 3	9	6,00	6,40	1200,2	1201,2	682,8	2,315										14650	14650	3,0	
	10		6,40	1202,5	1202,9	683,0	2,313										14990	14990	3,1	
	11		6,40	1201,0	1201,4	681,3	2,309										15110	15110	3,0	
	12		6,50	1201,8	1202,6	681,9	2,308										15210	14602	2,9	
	Promedio						2,311	2,373	2,415	0,797	83,8	4,3	11,9	16,2	5,3	73,5		14838	3,0	
MUESTRA No 4	9	6,50	6,50	1197,1	1197,7	676,6	2,297										15250	14640	3,2	
	10		6,50	1200,2	1200,5	679,4	2,303										15280	14669	3,1	
	11		6,40	1200,3	1200,6	680,3	2,307										15210	15210	3,1	
	12		6,50	1200,5	1201,2	678,8	2,298										15310	14698	3,1	
	Promedio						2,301	2,356	2,392	0,694	83,0	3,8	13,2	17,0	5,9	77,7		14804	3,1	
MUESTRA No 5	13	7,00	6,30	1201,9	1202,6	675,3	2,279										14040	14040	3,5	
	14		6,40	1200,6	1201,2	672,6	2,271										13850	13850	3,4	
	15		6,30	1201,5	1201,8	673,1	2,273										13770	13770	3,4	
	16		6,40	1200,5	1201,1	674,1	2,278										13360	13360	3,5	
	Promedio						2,275	2,339	2,370	0,590	81,6	4,0	14,4	18,4	6,5	78,4		13755	3,4	

Ilustración 12. Estabilidad (N) - Contenido de asfalto (%). MDC-19 con diatomeas



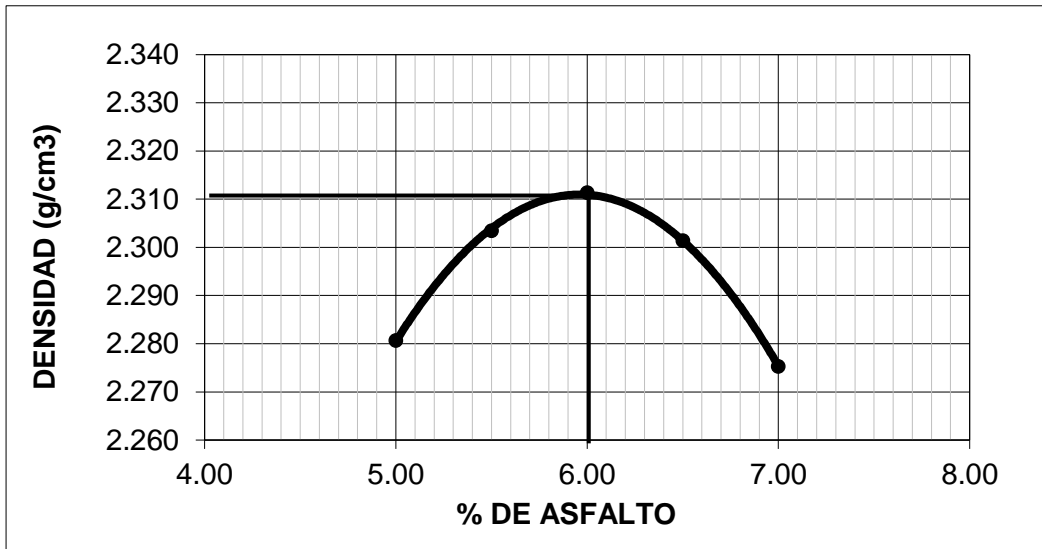
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 13. Flujo - Contenido de asfalto (%). MDC-19 con diatomeas



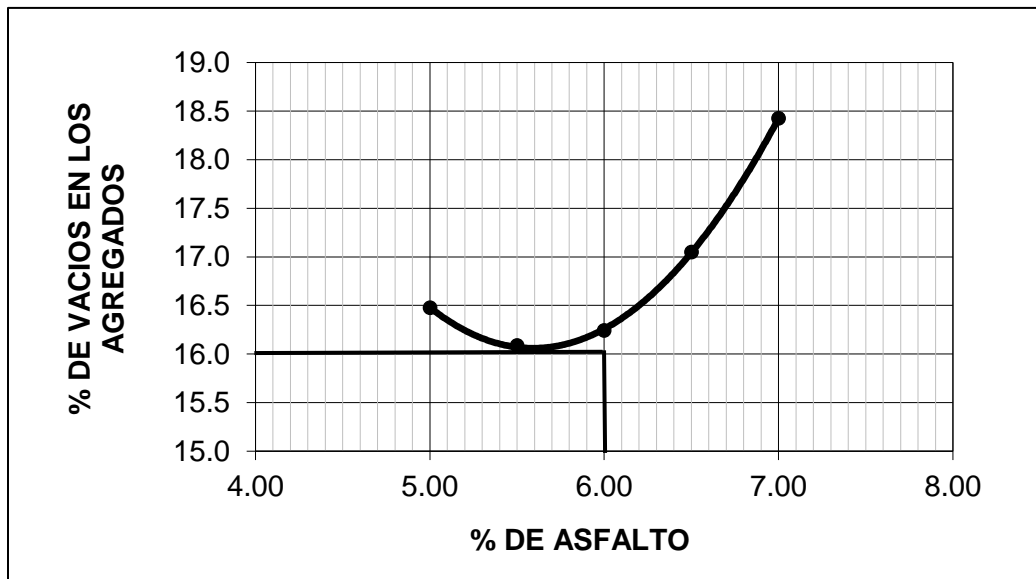
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 14. Densidad (g/cm³) - Contenido de asfalto (%).MDC-19 con diatomeas



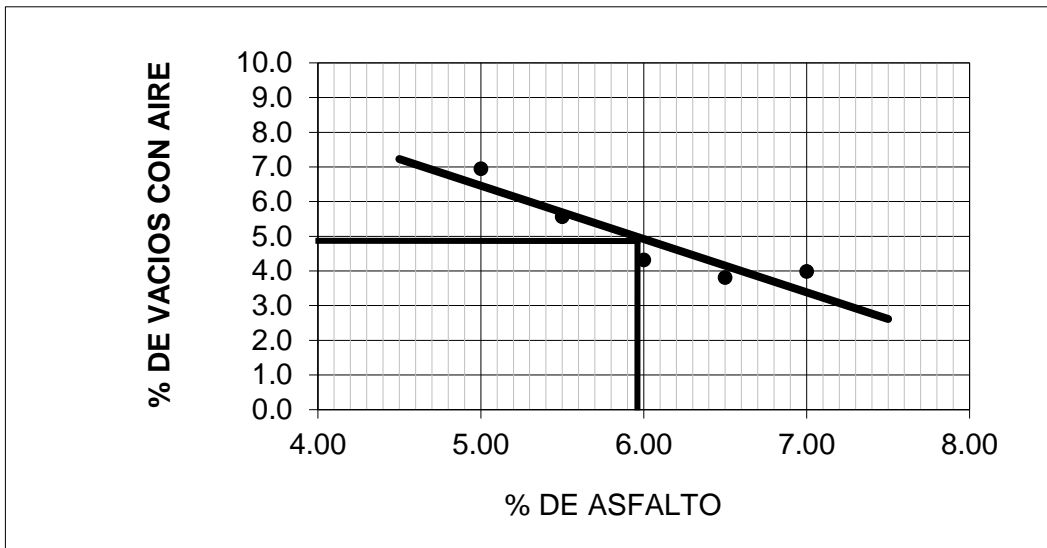
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 15. Vacíos en los agregados (%) - Contenido de asfalto (%). MDC-19 con diatomeas



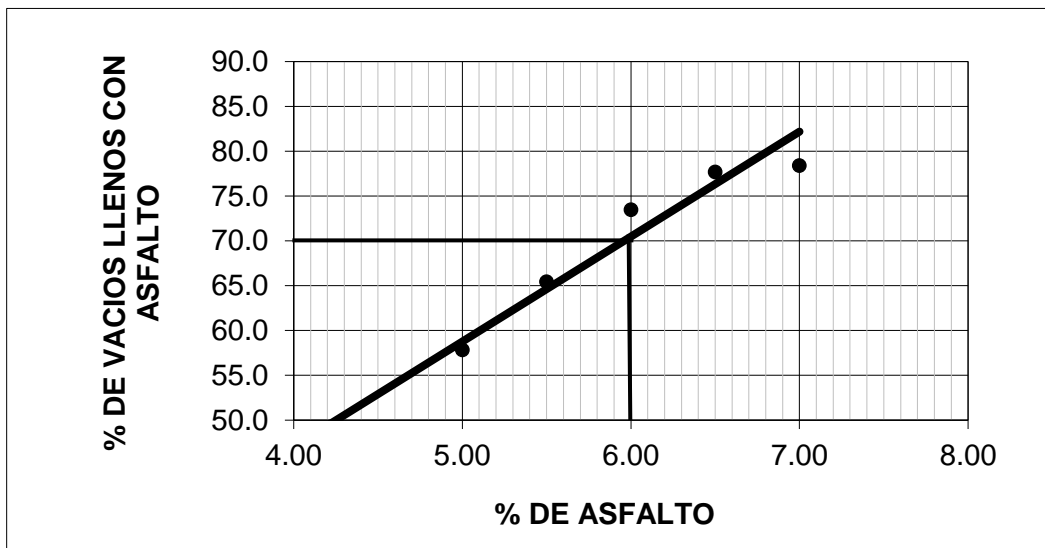
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 16. Vacíos con aire (%) - Contenido de asfalto (%). MDC-19 con diatomeas



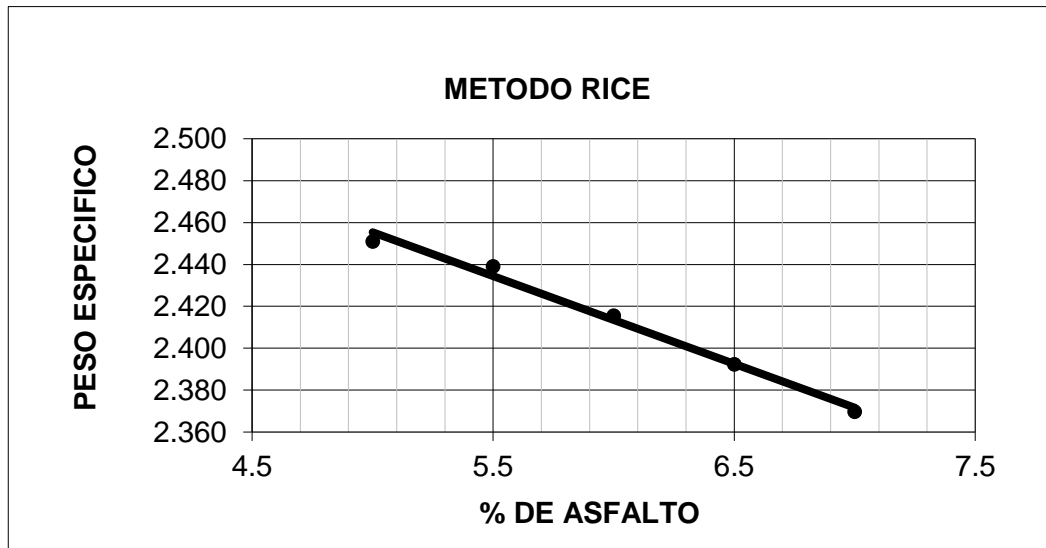
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 17. Vacíos llenos con asfalto (%) - Contenido de asfalto (%). MDC-19 con diatomeas



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 18. Método RICE



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 19. Resultados método RICE

	CONTENIDO DE ASFALTO	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
A	Peso molde vacío	0	0	0	0	0
B	Peso molde con agua y tapa	7381	7381	7381	7381	7381,0
C	Peso molde con material	1500	1500	1500	1500	1500
D	Peso material (C-A)	1500	1500	1500	1500	1500
E	Peso molde con material agua y tapa	8269	8266	8260	8254	8248
F	Volumen D-(E-B)	612	615,0	621,0	627,0	633,0
G	Densidad D/F	2,451	2,439	2,415	2,392	2,370

Fuente: Elaboración propia

9. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA (T.S.R) INV E-725-13

Se elaboraron seis especímenes de MDC-19 con filler de trituración de roca, con un contenido de vacíos 7%, y se dividieron en dos subgrupos. Se guardó a temperatura ambiente el subgrupo iba a ser probado en seco, y se saturó parcialmente el otro subgrupo en un baño de agua destilada a 60°C durante 24 horas.

Posteriormente, se colocaron estos mismo especímenes en un baño de agua a 25°C durante 1 hora, y finalmente se aplicó una carga diametral a una rata de deformación de 50mm/min hasta que se alcanzó la carga máxima. Los resultados se observan en la tabla

Tabla 12. Resultados del ensayo TSR en MDC-19 con filler de trituración de roca

PROBETA No	CONDICION	P max (V)		t espesor	t espesor	diametro	diametro	st
	humeda/ seca	Kg-f	lb-f	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(lbf/in2)
1	H	1159,4	2.550,7	6,4	0,252	101,1	3,98	1.619,1
2	H	1162,7	2.557,9	6,5	0,256	101,1	3,98	1.598,7
3	H	1165,4	2.563,9	6,4	0,252	101,1	3,98	1.627,5
4	S	1350,8	2.971,8	6,5	0,256	101,1	3,98	1.857,4
5	S	1349,6	2.969,1	6,4	0,252	101,1	3,98	1.884,7
6	S	1346,8	2.963,0	6,4	0,252	101,1	3,98	1.880,8

Finalmente, se calcula la relación de resistencias a tensión, y los resultados del cálculo se muestran en la tabla 13

Tabla 13 .Cálculo del T.S.R para MDC-19 con filler de trituración de roca

Condicion	st (lbs/in2) promedio	RRT
	st (lbs/in2) promedio	st(humedad)/st(seca)*100
Humeda	1.615,1	86,2
Seca	1.874,3	

Fuente: Elaboración propia

Se realizó el mismo procedimiento para la mezcla asfáltica MDC-19 con adición de diatomeas, y los resultados se muestran a continuación:

Tabla 14. Resultados del ensayo T.S.R en MDC-19 con adición de diatomeas

PROBETA No	CONDICION	P max (V)		t espesor	t espesor	diametro	diametro	st
		Kg-f	lb-f	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(lbf/in2)
1	H	1152,8	2.536,2	6,5	0,256	101,1	3,98	1.585,1
2	H	1157,2	2.545,8	6,5	0,256	101,1	3,98	1.591,2
3	H	1154,4	2.539,7	6,5	0,256	101,1	3,98	1.587,3
4	S	1471,3	3.236,9	6,4	0,252	101,1	3,98	2.054,7
5	S	1468,6	3.230,9	6,5	0,256	101,1	3,98	2.019,3
6	S	1474,5	3.243,9	6,4	0,252	101,1	3,98	2.059,1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Cálculo del TSR para MDC-19 con adición de diatomeas

Condicion	st (lbs/in2) promedio	TSR
	st (lbs/in2) promedio	st(humedad)/st(seca)*100
Humeda	1.587,9	77,7
Seca	2.044,4	

Fuente: Elaboración propia

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Contenido de asfalto

Teniendo en cuenta el diseño Marshall presentado por el laboratorio para cada muestra, se evidencia que para satisfacer el cumplimiento de todos los parámetros de la normatividad INVIAS, se requirió un contenido de asfalto de 6.1% para la mezcla asfáltica MDC-19 con filler proveniente de trituración de roca, y un contenido de 6% de asfalto para la mezcla MDC-19 con adición de diatomeas. Dichos resultados son contrarios a lo esperado ya que la diatomea Aulacoseira Granulata presenta una estructura porosa, razón por la que se esperaba un aumento en el contenido de asfalto.

- Estabilidad

Como se muestra en la tabla 16, la sustitución de un llenante mineral en una porción equivalente al 5.8% del material de trituración, por diatomeas, presenta una disminución en la resistencia a la deformación de la mezcla asfáltica en un 6%, lo cual es contrario a lo que se esperaba, ya que teniendo cuenta que las diatomeas han mostrado buena resistencia al corte en los suelos se esperaba que mostrara mejores resultados en la estabilidad en comparación con la mezcla asfáltica convencional.

Tabla 16. Comparación de resultados de Estabilidad (N)

	Estabilidad (N)
MDC-19 sin diatomeas	16000
MDC-19 con diatomeas	15000

Fuente: Elaboración propia

- Flujo:

La mezcla con diatomeas mostró una disminución en el flujo de 0.1 % en comparación con la mezcla convencional, lo cual no es muy significativo teniendo en cuenta la adición de un 5.8% de diatomeas.

Tabla 17. Comparación de resultados de flujo

	Flujo (0.01mm)
MDC-19 sin diatomeas	3.1
MDC-19 con diatomeas	3

Fuente: Elaboración propia

- % Vacíos con aire

A partir del Ensayo Marshall se buscó un contenido óptimo de asfalto de tal forma que se obtuviera un intervalo de vacíos entre el 4% y 6% en la mezcla para garantizar un adecuado comportamiento ante la formación de roderas. El porcentaje de vacíos con aire aumentó 0.1% para la mezcla con adición de diatomeas, en comparación con la mezcla asfáltica convencional.

Tabla 18. Comparación vacíos con aire (%)

	% Vacios con aire
MDC-19 sin diatomeas	4.8
MDC-19 con diatomeas	4.9

Fuente: Elaboración propia

- Vacíos en el Agregado mineral

Los vacíos en el agregado mineral aumentaron 0.1% en la mezcla MDC-19 con diatomeas

Tabla 19 . Comparación de VAM

	% VAM
MDC-19 sin diatomeas	15.9
MDC-19 con diatomeas	16

Fuente: Elaboración propia

- Vacíos llenos de asfalto

Se obtuvieron resultados iguales para la mezcla MDC-19 convencional y la que tiene adición de diatomeas.

Tabla 20. Comparación de vacíos llenos de asfalto

	% Vacios llenos de asfalto
MDC-19 sin diatomeas	70
MDC-19 con diatomeas	70

Fuente: Elaboración propia

- Resistencia conservada a la tracción indirecta

Como se muestra en la tabla 21, se presenta una disminución en este parámetro en la mezcla con adición de diatomeas, arrojando un valor por debajo del mínimo especificado en la norma INVIAS para mezclas asfálticas densas en caliente y un nivel de tránsito NT3.

Tabla 21. Comparación de Resistencia conservada a la tracción indirecta

	RTI
MDC-19 sin diatomeas	86,2
MDC-19 con diatomeas	77,7

Fuente: Elaboración propia

11. CONCLUSIONES

- En la presente investigación se observa que el reemplazo de un 5.8% de filler de trituración de roca, por diatomeas, no genera cambios significativos en el comportamiento de la mezcla asfáltica.
- A pesar de que se han encontrado altos ángulos de fricción en el suelo con la presencia de diatomeas, se observa una disminución en la estabilidad y en el flujo en la mezcla asfáltica dosificada con diatomeas.
- La mayoría de los parámetros de diseño de las mezclas asfálticas cumplen con lo exigido por la norma INVIAS para mezclas usadas en niveles de tránsito NT3, exceptuando el ensayo de Resistencia Conservada a la Tracción Indirecta, lo cual se traduce en una alta susceptibilidad a la humedad de la mezcla con diatomeas.
- Se deben realizar más ensayos con adición de diatomeas de diferentes tipos y en diferentes proporciones para corroborar su uso en las mezclas asfálticas.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez Loya, M. F. (2011). *Estudio del efecto del tipo de filler en las propiedades reológicas del "mástico"*. Obtenido de VII Congreso mexicano del asfalto: http://www.amaac.org.mx/archivos/eventos/7cma_2011/02.pdf

Arroyo Caycedo, Á. F., Miranda Cañon, V. A., Molina Suarez, M. A., Rodriguez Martinez, D. M., Salgado Gutiérrez, D. M., & Soler Albañil, M. D. (2017). *Análisis del comportamiento físico y mecánico de mezclas de concreto hidráulico MR-37 a partir de la adición de diatomeas a diferentes dosificaciones para pavimentos rígidos*. Bogotá.

Asociación de Productores y Pavimentadores Asfálticos de Colombia. (2004).

Asphalt Institute. (1996). *Antecedentes del Diseño y Analisis de Mezclas Asfalticas de Superpave*.

Blanchetto, H., Miro, R, Perez-Jimenez. (1998). *Effect of calcareous fillers and bituminous mix aging*.

Calceto, D. S., Hernández Bocanegra, D., Lizarazo Salamanca , N., Orjuela Ariza, J. D., Ramirez Cortes, D. X., & Sierra Sanchez, F. R. (2017). *Análisis del comportamiento de una mezcla densa en caliente tipo 2 (MDC-19) en concreto asfáltico a partir de la adición de diatomeas comparado a una muestra patrón*. Bogotá.

Cepeda, H. (1978). Diatomitas. Recursos Minerales de Colombia., (págs. 173-177). Bogotá.

Comportamiento monotónico de suelos diatomáceos. (2014). *Revista de Geotecnia*, 23-24.

Díaz Rodríguez, J. A. (2011). Comportamiento monotónico de suelos diatomáceos. *Revista Investigación de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 27-34.

Dolley, T. (2008). *Diatomite. U.S Geological Survey, Mineral Commodity Summaries*. Recuperado el Septiembre de 2017, de <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/ommodity/diatomite/mcs-2009-diato.pdf>.

Garrote Villar, E. (s.f.). *El ensayo de tracción indirecta*. Recuperado el Octubre de 2017, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3324/55872-8.pdf>

Gerardo, B., Rivera, J., Rebollo, O., & Patrón, E. (s.f.). *FILLER GRANITICO PROVENIENTE DE LAVADO ARENAS DE TRITURACION, ANALISIS DE PREFACTIBILIDAD DE USO EN MEZCLAS ASFALTICAS*. La plata.

Instituto Nacional de Vías. (s.f.). Recuperado el Octubre de 2017, de <https://www.invias.gov.co/index.php/buscador?searchword=noticias&searchphrase=all>.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. (2013). Normas de ensayos de materiales.

Kraemer, C. P.-B. (2004). *Ingeniería de Carreteras*. Madrid.

Lloyd E., A. (1998). *Diatomite: U.S. Geological Survey Mineral Commodity*

Summaries.

Manosalva Sanchez, S. R., & Naranjo Merchán, W. E. (2009). *Diatomitas. Geología, caracterización y potencial uso industrial*. Sogamoso.

Morea, F. (6 de Septiembre de 2011). Recuperado el Abril de 2017, de file:///J:/PAVIMENTOS/ESPECIALIZACION%20INGENIERIA/PAVIMENTOS/TESIS%20LLENANTE%20MINERAL/Dr%20en%20ingenieria.pdf

Navarro, I. S. (2011). ESTUDIO DEL EFECTO DEL TIPO DE FILLER EN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL MASTICO. VII CONGRESO MEXICANO DEL ASFALTO, (pág. 3). MÉXICO.

Paez Duenas, A. P.-J. (2009). *Evaluation of the Cohesion of Crumb Rubber Modified Bitumens by Means of UCL Method*.

Reyes Ortiz, O. J., Troncoso Rivera, J. R., & Camacho Tauta, J. F. (2006). *COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON ADICIÓN DE CENIZAS VOLANTES*.

Ruiz, C. (1960). *CONCENTRACIÓN CRÍTICA DE FILLER, SU ORIGEN Y SIGNIFICADO EN LA DOSIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. La Plata, Buenos Aires.

Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica. (2014). *Comportamiento monotónico de suelos diatomáceos*. Obtenido de Revista de Geotecnia: <https://issuu.com/smigorg/docs/revista-geotecnia-smig-numero-233/22>

Tierra de diatomeas de grado alimentario. (s.f.). Recuperado el 25 de Septiembre de 2017, de <https://diatomeasgradoalimentario.com/aplicaciones-y-usos/industria/>

Y. Montoya Moreno, S. Sala, A. Vouilloud N. Aguirre, & Y. Plata. (2013). *Lista de las diatomeas de ambientes continentales de Colombia.* Biota.

Zuluaga, D., Slebi, C., & Caicedo, B. (s.f.). Characterization parameters and mechanical response in diatomaceous soil depending on species.